

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2005 年 8 月 11 日 (11.08.2005)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2005/072916 A1

- (51) 国際特許分類⁷: B25J 5/00, 13/00
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2005/001450
- (22) 国際出願日: 2005 年 1 月 26 日 (26.01.2005)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願2004-020328 2004 年 1 月 28 日 (28.01.2004) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): トヨタ自動車株式会社 (TOYOTA JIDOSHA KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒4718572 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地 Aichi (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 山本 貴史 (YAMAMOTO, Takashi) [JP/JP]; 〒4718572 愛知県豊田市

トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内 Aichi (JP). 杉原 久義 (SUGIHARA, Hisayoshi) [JP/JP]; 〒4718572 愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内 Aichi (JP). 菅 敬介 (SUGA, Keisuke) [JP/JP]; 〒4718572 愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内 Aichi (JP). 津坂 祐司 (TSUSAKA, Yuji) [JP/JP]; 〒4718572 愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内 Aichi (JP). 但馬 竜介 (TAJIMA, RyoSuke) [JP/JP]; 〒4718572 愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内 Aichi (JP).

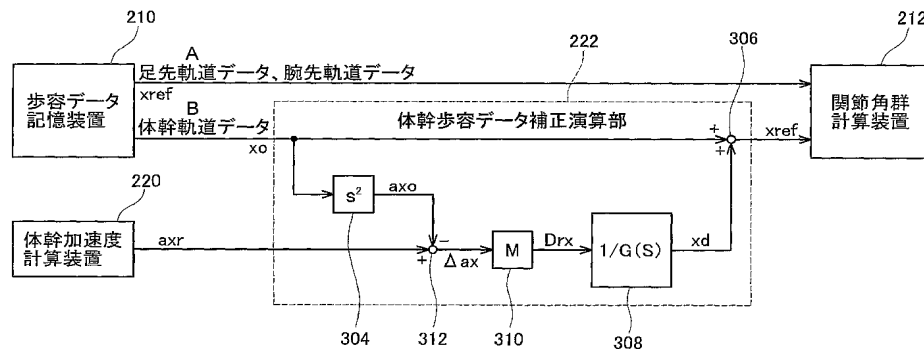
(74) 代理人: 特許業務法人 快友国際特許事務所 (KAI-U PATENT LAW FIRM); 〒4500002 愛知県名古屋市中村区名駅二丁目 4 番 1 4 号 日石名駅ビル 7 階 Aichi (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,

[続葉有]

(54) Title: LEG-EQUIPPED ROBOT AND LEG-EQUIPPED ROBOT WALK CONTROL METHOD

(54) 発明の名称: 脚式ロボットと脚式ロボットの歩行制御方法



210.. WALK STATE DATA STORAGE DEVICE
A.. LEG TIP TRAJECTORY DATA, ARM TIP TRAJECTORY DATA
B.. TRUNK TRAJECTORY DATA
222.. TRUNK WALK STATE DATA CORRECTION CALCULATION UNIT
212.. JOINT ANGLE GROUP CALCULATION UNIT
220.. TRUNK ACCELERATION CALCULATION UNIT

(57) Abstract: In a leg-equipped robot, a deviation of an actual trunk movement from a target trunk movement is calculated and according to the deviation calculated, the target trunk movement is corrected.

(57) 要約:

脚式ロボットにおける、目標とする体幹運動と実際の体幹運動との偏差を算出し、算出された偏差に基づいて、前記目標とする体幹運動を補正する。

WO 2005/072916 A1



DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE,

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

明細書

脚式ロボットと脚式ロボットの歩行制御方法

本出願は、2004年1月28日に出願された日本国特許出願第2004-20328号に基づく優先権を主張する。その出願の全ての内容はこの明細書中に参照により援用されている。

技術分野

本発明は、体幹（胴部）に対して脚リンクが揺動可能に連結されている機械（脚式ロボットの機械系）を制御して歩行させる技術に関する。詳しくは、予期せぬ外乱力が作用しても安定して歩行し続けることができる脚式ロボットと、その歩行制御方法に関する。

背景技術

左足リンクと体幹と右足リンクの相対的姿勢を変化させることによって歩行する脚式ロボットが開発されている。

脚式ロボットが歩行するためには、左足先と体幹と右足先の運動を指示するデータを必要とする。そのうちの体幹位置は、足先位置に対して適当な値である必要があり、その値が適当でなければロボットは転倒してしまう。

脚式ロボットが転倒しない体幹位置を得るためには、ロボットのダイナミクスを考慮に入れた複雑な計算を必要とする。その計算過程は大略下記のものである。

（１）ロボットの左足先と右足先の位置を指示する経時的データを指定する。

(2) 足先位置を考慮してロボットのZMPが存在しなければならない位置を指定する。ZMP (zero moment point) は、ロボットに作用する重力や床反力や慣性力の合力のモーメントがゼロになる床上の点をいう。ZMPが接地脚の足平内にあればロボットは転倒しない。逆にいうと、ロボットが転倒しないためには、ZMPが接地脚の足平内になければならない。そこで接地脚の足先位置を考慮し、下記の間係を満たす目標ZMPを指定する。即ち、一方の脚リンク (例えば左脚) が遊脚になっている間は接地脚 (右脚) の足平内に存在し、その一方の脚 (左脚) が接地して両足接地状態になった時に新たに接地した脚 (左脚) の足平内に向けて移動開始し、それまでに接地していた脚 (右脚) が遊脚となる前に新たに接地した脚 (左脚) の足平内に移動し終えるZMPを指定する。このようにして指定されたZMPは、目標ZMPと呼ばれる。実際のZMPが目標ZMPのとおり移動すれば、ロボットは転倒することなく歩行し続ける。

(3) 足先位置の変化とそれに追従して変化する目標ZMPが指定されると、体幹位置の経時的变化を仮定してロボットのダイナミクスを計算する。計算する時点で、足先軌道が指定されているために、ロボットの体幹位置を仮定するとロボットの姿勢が決まる。ロボットの姿勢が決まると、その姿勢におけるZMPの位置を計算することが可能となる。ZMPの位置を計算するためには、静的な要素に加えて、ロボットに作用する慣性力の影響を考慮しなければならない。仮定した体幹位置の経時的变化を計算に含めることで、ロボットのダイナミクスまで考慮してZMPの位置を計算することが可能となる。体幹位置の経時的变化 (体幹軌道) を仮定するとZMPの位置を計算することができることから、目標ZMPに一致するZMPを実現する体幹軌道 (体幹位置の経時的变化) を探求することができる。

上記によって探求された体幹位置の経時的变化を示すデータを体幹歩容データといい、もともと指定されている足先位置の経時的变化を示すデータを足先歩容データといい、両者を総称して歩容データという。歩容データに従ってロボットが歩行すれば、実際のZMPが目標ZMPに一致し、ロボットは転倒せずに歩行しつづけることができる。

歩容データは、時間に対する位置の変化で与えられるが、位置と速度と加速度は関連しており、そのうちの一つの量から他の量を計算することができるために、位置でも速度でも加速度でもよい。本明細書では、歩容データが、位置・速度・加速度のいずれかで記述されるために、運動を記述するデータということにする。

目標ZMPに一致するZMPをもたらす体幹運動を算出する手法は、目標足先運動の変化に追従してロボットが歩行し続けることを可能とする目標体幹運動の経時的変化を算出する手法の典型例であり、それには限られない。一般的にいうと、脚式ロボットは、体幹と体幹に対して揺動可能に連結されている脚リンクを備えており、目標とする足先運動の経時的変化を記述する足先歩容データが指示されると、目標足先運動の変化に追従して歩行し続けることを可能とする目標体幹運動の経時的変化を記述する体幹歩容データを算出し、指示された足先歩容データと算出された体幹歩容データを用いて歩行する。算出される体幹歩容データには、体幹位置に関するデータの他、体幹の傾斜角度に関するデータまで算出することがある（体幹の傾斜角度については所定のパターンに従うとしておけば、体幹傾斜角度まで算出する必要がないことがある）。体幹の位置や傾斜角度に関するデータは、位置や角度自体であったり、その変化速度であったり、その加速度であったりする。

ロボットに予期せぬ外乱力が作用することがある。路面の予期せぬ凹凸によって予期せぬ外乱力が作用することもあるし、ロボットに外界から押したり引いたりする外力が加えられることもある。ロボットの構造上のたわみや、ロボットの関節のガタや、ロボットの応答遅れ等に起因して歩容データから外れれば、予期せぬ外乱力が作用したのと同じことになる。

予期せぬ外乱力が作用すると、ロボットがバランスを崩す場合がある。そこで、特開平5-305579号公報に記載の歩行制御装置が提案されている。

特開平5-305579号公報に記載の歩行制御装置では、ロボットに

作用する床反力あるいは床反力モーメントを測定してZMP位置を実測する。実測されたZMP位置を目標ZMP位置と比較し、その偏差を両足平の目標位置や姿勢へフィードバックすることで歩行の安定化をはかっている。

5

発明の開示

特開平5-305579号公報に記載の歩行制御装置では、床反力あるいは床反力モーメントの検出が必須であり、床反力あるいは床反力モーメントを検出するために、右脚および左脚の足先近傍に6軸力センサ等の高性能な力センサを搭載する必要がある。

6軸力センサ等の高性能な力センサは高価である。また足先はロボットの歩行に伴って着地衝撃荷重が繰り返し作用する部位であり、足先近傍へセンサを搭載すると、衝撃荷重によってセンサが故障しやすい。足先に搭載されている力センサが故障すると、ロボットは歩行を続けることができない。また足先に力センサを搭載する場合、力センサから演算部へ信号を伝達するために多くの部品を必要とする。部品のどれかひとつでも故障した場合には、力センサからの信号が演算部へ正しく伝達されなくなり、結果として力センサが機能しない状態となる。

このような背景から、脚式ロボットの製造コストを下げて信頼性を向上させるためには、足先に力センサを搭載する必要をなくし、より簡易な構成で歩行の安定をはかる技術が必要とされる。

本発明は上記のような従来技術の問題点を解決するために創作されたものであり、足先に力センサを搭載しなくても安定して歩行し続けることができる脚式ロボットとそのための歩行制御方法を提供する。

本発明で創作された脚式ロボットは、体幹と、体幹に対して揺動可能に連結されている脚リンクを備えている。さらに、目標とする足先運動の経

時的変化を記述する足先歩容データの記憶手段と、目標とする体幹運動の経時的変化を記述する体幹歩容データの記憶手段を備えている。目標とする体幹運動は、目標とする足先運動の変化に追従して歩行しつづけることを可能とする関係に設定されている。例えば、実際のZMPを目標足先位置の変化に追従する目標ZMPに一致させる体幹運動が記憶されている。

5 本発明のロボットは、さらに、実際の体幹運動を検出する体幹運動検出手段と、目標とする体幹運動と実際の体幹運動の偏差を算出する偏差算出手段を備えている。さらに、算出された偏差から所定の伝達関数に基づいて補正量を求め、その補正量に基づいて体幹歩容データ記憶手段に記憶されている体幹歩容データを補正する補正手段を備えている。

本発明を歩行制御方法として理解することも可能である。本発明の歩行制御方法では、目標とする足先運動の経時的変化を記述する足先歩容データを記憶する工程と、目標とする体幹運動の経時的変化を記述する体幹歩容データを記憶する工程を実施する。目標とする体幹運動は、目標とする足先運動の変化に追従して歩行しつづけることを可能とする関係に設定されている。例えば、実際のZMPを目標足先位置の変化に追従する目標ZMPに一致させる体幹運動が記憶される。

15 本発明の歩行制御方法では、実際の体幹運動を検出する工程と、目標とする体幹運動と実際の体幹運動の偏差を算出する工程を備えている。さらに、算出された偏差から所定の伝達関数に基づいて補正量を求め、その補正量に基づいて体幹歩容データを補正し、補正された体幹歩容データをロボットの関節角を計算する装置に指示する工程を実施する。ロボットにはロボットが備えている関節毎に関節角を計算する装置が用意されている。

25

上記の脚式ロボットとその歩行制御方法では、ロボットの実際の体幹運動をモニタリングし、目標とする体幹運動との偏差から、目標とする体幹運動を記述する体幹歩容データの補正量を求める。体幹運動が直接にフィードバック制御されることから、体幹運動が安定化する。ロボットはバラ

ンスを崩すことなく、安定して歩行し続けることができる。

実験によって、実際の体幹運動をモニタリングしてフィードバック制御することによって、ZMP位置を実測してフィードバック制御しなくても、歩行し続けられることが確認されている。外乱力等が作用しても歩行し続けられることが確認されている。

この制御方式によると、ZMP位置を実測する必要がなく、そのための力センサを必要としない。信頼性の高い歩行ロボットを安価に実現することができる。

- 10 偏差算出手段が、目標とする体幹加速度と実際の体幹加速度との偏差を算出することが好ましい。この場合、加速度の偏差から、ロボットに作用した予期せぬ外乱力の大きさを計算することができる。そこで外乱力を補償するだけの力をロボットに発揮させるのに必要な目標体幹運動の補正量を計算することが可能となる。補正量算出過程では、加速度偏差から計算
- 15 される外乱力と所定の伝達関数に基づいて補正量を求める。

計算された補正量で補正された目標体幹運動をロボットに指示すると、ロボットは外乱力の影響を補償しながら歩行を続けることができる。体幹に加速度センサを搭載することは比較的容易であることから、この方式は非常に実地的である。

20

加速度偏差から伝達関数を利用して目標体幹位置の補正量を計算する場合には、伝達関数が比例要素を含むことが好ましい。この場合、実際の体幹位置が目標体幹位置からずれた場合に、そのずれに比例する補正量が計算され、結果的には目標体幹位置に向けてバネで引き寄せる現象が得られる。

25

伝達関数が比例要素の他に、1次遅れ要素または2次遅れ要素あるいはその双方を含むことがさらに好ましい。この場合、実際の体幹位置が目標体幹位置からずれた場合に、位置のずれの変化速度および／または加速度に比例する補正量が計算され、結果的には目標体幹位置に向けて収束させ

る現象が得られる。

実際の体幹位置が検出できる場合には、加速度偏差に基づいて補正した目標体幹位置と実際の体幹位置の偏差にフィードバック処理を施した量を

5 加算することによって目標体幹位置をさらに補正することが好ましい。

この場合、ロボットが不整地を歩行してロボットの全体が傾斜しても、実際の体幹位置を目標体幹位置にフィードバック制御することができ、簡単な機構でロボットが不整地を安定して歩行できるようになる。

10 この発明によると、足先に力センサを用いずに、安定して歩行し続ける脚式ロボットを実現することができる。安価に信頼性の高い脚式ロボットを実現することができる。

15 図面の簡単な説明

本発明は以下の図面を参照することによって、より良好に理解されるだろう。図面の構成要素は必ずしも一定の縮尺ではなく、代わりに本発明の原理を明示するために強調が用いられている。図面中では、参照符号は異なる図面を通じて対応する部分を示す。

20

図 1 は、脚式移動ロボットの歩行の概略を示す図である。

図 2 は、実施例 1 のコンピュータ装置の機能をブロック化して示す図である。

図 3 は、実施例 1 の体幹歩容データ補正演算部の機能をブロック化して

25 示す図である。

図 4 は、体幹の力学モデルを示す図である。

図 5 は、体幹に作用する理想軌道への復元力を模式的に示す図である。

図 6 (a) と図 6 (b) は、目標体幹運動の補正が体幹の運動にもたらす効果を模式的に示す図である。

図 7 は、実施例 1 のロボットの歩行制御方法の処理手順を示す図である。

図 8 は、実施例 1 の体幹歩容データの補正演算の処理手順を示す図である。

5 図 9 は、実施例 2 のコンピュータ装置の機能をブロック化して示す図である。

図 10 は、実施例 2 の体幹歩容データ補正演算部の機能をブロック化して示す図である。

10 図 11 は、実施例 2 の体幹歩容データの補正演算の処理手順を示す図である。

発明を実施するための最良の形態

15 以下、本発明を実験例によりさらに詳細に説明するが、本発明にかかる実験例に示すものに限定することを意図したものではない。

(実施例 1)

20 図 1 に示すロボット 6 は、右脚が接地している間に左脚を遊脚として軌道 7 のように移動させ、左脚が接地すると今度は右脚を遊脚として軌道 8 のように移動させ、以下同様に、左脚を遊脚として軌道 9 のように移動させ、次には右脚を遊脚として軌道 10 のように移動させて歩行を続ける。

25 ロボット 6 が歩行を続けるためには、足先基準点 L, R の軌道 7, 8, 9, 10 を記述する足先軌道データや、腕先軌道データや、体幹 12 の基準点 W の軌道を記述する体幹軌道データで構成される歩容データが必要とされる。足先軌道データはオペレータが指定する。腕先軌道データは足先軌道データに対応して計算される。体幹軌道データは、ロボットの力学モデルを用いて計算される ZMP 軌道が目標 ZMP 軌道に一致する関係に設定される。

ロボット6の歩行を制御するために、ロボット6の体幹12にコンピュータ装置14が搭載されている。コンピュータ装置14は、CPU、ROM、RAM、ハードディスク等を有する。コンピュータ装置14のハードウェア構成は汎用のコンピュータと同じであり、説明は省略する。コンピュータ装置14は歩容データを記憶しており、それに基づいてロボット6の関節群を制御する。

本実施例では、図1に示すように、ロボット6の歩行方向をx軸とし、体側方向をy軸とし、高さ方向をz軸とする。

図2は、コンピュータ装置14の機能をブロック化して示す図である。図2に示す要素のうち、ロボットの機械系216および体幹加速度センサ218を除いた部分がコンピュータ装置14の構成要素である。コンピュータ装置14は、全体が物理的に1つの装置に含まれていてもよいし、物理的に分離された装置ごとに分けて収容されていてもよい。

歩容データ記憶装置210には、予め計算されたロボット6の歩容データが記憶されている。歩容データとは、腕先軌道データ（腕先歩容データ）、足先軌道データ（足先歩容データ）と体幹軌道データ（体幹歩容データ）のことをいう。予め記憶されている歩容データのうち、腕先軌道データと足先軌道データは、関節角群計算装置212へ直接に入力される。体幹歩容データは、体幹歩容データ補正演算部222へ入力され、ロボット6の歩行に伴いその都度補正され、補正された体幹軌道を示すデータが関節角群計算装置212へ入力される。

関節角群計算装置212は、入力された歩容データに基づいて、いわゆる逆キネマティクスを解くことでロボット6の各関節角 $\theta_1(t)$ 、 $\theta_2(t)$ 、 $\theta_3(t)$ 、・・・を計算する。計算された関節角群データは、アクチュエータ制御部214に入力される。

アクチュエータ制御部 214 は、図 1 のロボット 6 の関節群を回転させるアクチュエータ群を制御する。アクチュエータ群はロボットの機械系 216 に存在している。アクチュエータ群を制御すると、ロボット 6 の関節角を計算された関節角に調整できる。ロボット 6 は歩容データに従って歩
5 行する。

体幹 12 には体幹加速度センサ 218 が搭載されており、体幹の x 方向（歩行方向）と y 方向（体側方向）と z 方向（高さ方向）の加速度を検出する。体幹加速度計算装置 220 は、体幹加速度センサ 218 で検出され
10 た実際の体幹加速度 a_{xr} 、 a_{yr} 、 a_{zr} を体幹歩容データ補正演算部 222 へ出力する。

体幹歩容データ補正演算部 222 は、歩容データ記憶装置 210 に記憶されている体幹軌道データ（体幹歩容データ）と、体幹加速度計算装置 220 で計算されたロボットの実際の体幹加速度に基づいて、体幹軌道データの補正を行う。体幹軌道データの補正の詳細については後述する。補正された体幹軌道データは、関節角群計算装置 212 へ入力される。
15

図 3 は、体幹歩容データ補正演算部 222 の詳細を示したブロック線図である。図 3 では図示の明瞭化のために、x 方向の事象のみを図示している。y 方向と z 方向についても同様である。足先軌道データと腕先軌道データは、補正されないで直接に関節角群計算装置 212 に指示される。
20

体幹歩容データ補正演算部 222 では、歩容データ記憶装置 210 に記憶されている体幹歩容データが示す目標体幹位置 x_o 、 y_o 、 z_o （それぞれは経時的に変化する）を、時間に関して二階微分演算を行う装置 304 によって、目標体幹加速度 a_{xo} 、 a_{yo} 、 a_{zo} を算出する。
25

偏差演算装置 312 では、実際の体幹加速度 a_{xr} 、 a_{yr} 、 a_{zr} から、目標体幹加速度 a_{xo} 、 a_{yo} 、 a_{zo} を減じて、加速度偏差 Δa_x 、 Δa_y 、 Δa_z を算出する。

外乱力算出装置 310 は、算出された加速度偏差 Δa_x 、 Δa_y 、 Δa_z に、ロボットの質量 M を乗じることによって、ロボットに作用したと推定される外乱力 $D r_x$ 、 $D r_y$ 、 $D r_z$ の大きさを算出する。ロボットの関節等にガタがあったり、制御に応答遅れがあったり、外界から外力が加
 5 わると、実際の体幹加速度が目標とする体幹加速度にならず、予期せぬ外乱力によって加速度偏差 Δa_x 、 Δa_y 、 Δa_z が生じる。加速度偏差 Δa_x 、 Δa_y 、 Δa_z から、ロボットに作用した外乱力 $D r_x$ 、 $D r_y$ 、 $D r_z$ の大きさを算出することができる。

10 目標補正量算出装置 308 は、算出された外乱力 $D r_x$ 、 $D r_y$ 、 $D r_z$ を入力し、伝達関数 $1/G(s)$ に基づいて、目標体幹位置の補正量 x_d 、 y_d 、 z_d を求める。伝達関数 $1/G(s)$ は、2 次の項の係数を M_i 、1 次の項の係数を C_i 、0 次の項の係数を K_i とする遅れ要素からなる。 M_i 、 C_i 、 K_i は所望のパラメータであり、予め指定されている。

15 目標補正量算出装置 308 の処理は、たとえば x 方向について、

$$D r_x = M_i \cdot x_d(2) + C_i \cdot x_d(1) + K_i \cdot x_d(0)$$

の微分方程式を解いて x_d を求めることに相当する。ここで、(2) は時間に関する 2 階微分を示し、(1) は時間に関する 1 階微分を示し、(0) は x_d 自身を示す。

20 なお補正量 x_d の符号のとり方によっては、

$$-D r_x = M_i \cdot x_d(2) + C_i \cdot x_d(1) + K_i \cdot x_d(0)$$

と表現する方が正しいこともある。

目標体幹位置補正装置 306 は、歩容データ記憶装置 210 に記憶されている補正前の目標体幹位置 x_o 、 y_o 、 z_o に、補正量 x_d 、 y_d 、 z_d を加算して、補正後の目標体幹位置 x_{ref} 、 y_{ref} 、 z_{ref} を算
 25 出し、関節角群計算装置 212 へ指示する。

上記した目標体幹軌道データを補正する制御則がもたらす作用を説明す

る。

図4はロボットの力学モデルを示す。体幹12が目標体幹位置にあるときの体幹を402で示し、目標体幹位置から外れたときの体幹を404で示す。

- 5 図4の(1)式はロボットの一般的な運動方程式を示す。Fは体幹に作用する全外力、Mは体幹の質量、aは体幹の加速度を示す。

体幹には歩行に適切な理想軌道(目標軌道)が存在する。目標軌道は、ロボットに外乱力が作用しない限り、目標ZMPに一致するZMPを実現する体幹軌道である。

- 10 (2)式は目標体幹軌道に沿って運動するロボットの体幹402の運動方程式を示す。F_oは体幹402に作用する全外力、a_oは体幹402の目標加速度を示す。

- 15 F_oは目標体幹軌道を運動するときに体幹402に作用する全外力であり、ロボットが理想的な歩行をする状態で脚リンクから体幹に作用する内力およびロボットの体幹に作用する重力の合力である。

実際の体幹の運動は、予測できない路面の凹凸や、ロボットの構造上のたわみなど、外乱力の影響を受けるため、目標体幹軌道のとおりには制御することは困難である。実際の体幹の運動を実軌道と呼ぶ。

- 20 (3)式は実軌道に沿って運動するロボットの体幹404の運動方程式を示す。F_rは体幹404に作用する全外力、a_rは体幹404の実際の加速度を示す。

- 25 (4)式はロボットの体幹に作用する外乱力の推定式を示す。D_rはロボットに作用する外乱力が体幹の運動に及ぼす影響を、体幹の重心に作用する外力として表現した外乱力を示す。F_oは目標体幹軌道を運動するときに体幹に作用する全外力であり、ロボットが理想的な歩行をする状態で脚リンクから体幹に作用する内力およびロボットの体幹に作用する重力の合力である。F_rは実軌道を運動する体幹に作用している全外力であり、ロボットが理想的な歩行をする状態で脚リンクから体幹に作用する内力、ロボットの体幹に作用する重力と外乱力の合力である。したがって、F_r

と F_o の差をとることによって、体幹に作用する外乱力 D_r を推定することができる。

(5) (6) 式は、実施例で用いる目標体幹位置の補正量 x_d を算出する式を示す。伝達関数 $G(s)$ は、図 5 に示す「ばね－質点－ダンパ系」
5 を記述している。

図 5 は、目標体幹位置を補正することによって、理想軌道へ復帰させる力がロボットの体幹に加わる関係を、模式的に示した図である。

補正前の目標体幹位置 510 は、目標 ZMP に一致する ZMP を実現する理想的な体幹位置である。
10

実際には、外乱力 D_r が作用したために、実際の体幹位置 512 は目標体幹位置 510 からずれている。

補正後の目標とする体幹位置 506 は、補正前の目標体幹位置 510 から x_d だけ離れた点である。

15 目標体幹位置を (6) で補正すると、補正後の目標体幹位置 506 と補正前の目標体幹位置 510 がばね定数 K_i のばね 502 と、減衰係数 C_i のダンパ 508 を介して結合され、補正後の目標体幹位置 506 に質量 M_i の質点 504 を有し、実際の体幹位置 512 に外乱力 D_r が作用しているという「ばね－質点－ダンパ系」と等価なものとなる。「ばね－質点－
20 ダンパ系」の伝達関数 $1/G(s)$ が、2 次の項の係数 M_i 、1 次の項の係数 C_i 、0 次の項の係数 K_i で示される遅れ要素を含んでおり、急激な変動をする外乱力に対して目標体幹位置に復帰させる復帰力を発揮させるとともに、急激な位置変動を抑制するショックアブソーバーの役割を果たす。

25 0 次の係数 K_i は、外乱力 D_r に比例する目標体幹位置の補正量を導出する。1 次の係数 C_i は外乱力 D_r の 1 次遅れ要素に比例する目標体幹位置の補正量を導出する。2 次の係数 M_i は、外乱力 D_r の 2 次遅れ要素に比例する目標体幹位置の補正量を導出する。

このうち、比例要素の係数 K_i は不可欠であるが、1 次遅れ要素の係数

C_i と 2 次遅れ要素の係数 M_i の一方又は双方を省略することができる。
1 次遅れ要素の係数 C_i と 2 次遅れ要素の係数 M_i の一方又は双方をゼロにしても、ロボットは安定して歩行し続けることが確認されている。

5 図 6 に目標体幹運動を補正する効果を模式的に示す。

図 6 (a) は、目標体幹運動の補正を行わないロボットが歩行する様子を示す。外乱力 D_r が体幹に作用すると、ロボットの体幹位置 602 は外乱力 D_r に追従して理想軌道から外れる。外乱力が急激な変化をする場合には、実際の体幹運動も急激に変化するため、歩行は不安定になる。

10 図 6 (b) は、目標体幹運動を補正するロボットが歩行する様子を示す。ロボットに外乱力 D_r が作用すると、外乱力 D_r が作用した方向と反対側に目標体幹位置を x_d だけ補正する。その結果、質量 M_i の質点を加速度 $x_d(2)$ で反対側に運動させたのと同じ力を発生させる。ロボットには、質量 M_i の質点との間を、ばね定数 K_i のばね 502 と減衰係数 C_i のダンパ 508 を介して結合し、質量 M_i の質点を距離 x_d だけ離れたときと同様の力が作用する。この力が外乱力 D_r を補償する。ロボットの体幹位置は、目標体幹位置に向かって復帰する。補正前の目標体幹位置に接近すると、補正量 x_d も小さくなる。ロボットの実際の体幹位置は、目標体幹位置を補正することによって、補正前の目標体幹位置に復帰する。

20 ロボットの動力学特性の面からみると、遅れ要素 610 を介して外乱力 D_r を補償することとなり、バネとショックアブソーバーを利用して、ロボットを目標位置 606 の近傍に維持することに相当する。

等価な力学系から明らかなように、本実施例の制御技術によると、外乱力を補償するための制御から急激な変動が除去されており、限られた能力
25 のアクチュエータで対応することができる。ロボットは、急激に変動することなく、目標とする体幹軌道によく追従することができる。実際にテストしてみると、ロボットの体幹が安定して歩行することを確認することができる。観測する者は、安心してロボットが歩行する様子を観測することができる。

図 7 はロボット 6 の歩行制御方法の処理手順を示す。

ステップ S 2 では、目標とする足先位置、腕先位置と体幹位置の経時的変化を記述する歩容データを歩容データ記憶装置 2 1 0 に記憶する。

5 ステップ S 4 で、ロボットは歩行を開始する。歩行を開始すると、ロボット 6 はステップ S 8 以下を繰返して実行する。すなわち、所定時間 (Δt) ごとにステップ S 8 からステップ S 1 6 の処理を繰返し実行する。

10 ステップ S 8 では、目標とする体幹運動と実際の体幹運動との差に基づいて、ロボットの歩行が安定するように、目標とする体幹運動を記述するデータ (体幹歩容データ) を補正する。ステップ S 8 で行う処理の詳細は後述する。

ステップ S 1 2 では、歩容データ記憶装置 2 1 0 に記憶されている足先軌道データおよび腕先軌道データと、ステップ S 8 で補正された体幹軌道データを、関節角群計算装置 2 1 4 に入力する。

15 ステップ S 1 4 では、関節角群計算装置 2 1 2 によって、入力された歩容データに基づいて、ロボット 6 の各関節の関節角を計算する。計算された関節角群データは、ロボットのアクチュエータ制御部 2 1 4 に指示される。アクチュエータ制御部 2 1 4 は、ロボット 6 の各関節を回転させるアクチュエータ群を制御する。これにより、ロボット 6 の関節角が計算値に調整される。

20 すでに述べたように、ステップ S 8 からステップ S 1 6 の処理は、所定時間 (時間間隔 Δt) ごとに繰返し実行される (ステップ S 6)。

図 8 はステップ S 8 の体幹歩容データ補正演算の処理手順を詳細に示す。

25 ステップ S 2 2 では、歩容データ記憶装置 2 1 0 に記憶されている体幹歩容データから、目標とする体幹加速度を算出する。

ステップ S 2 4 では、体幹加速度センサ 2 1 8 の検出値を取り込む。

ステップ S 2 6 では、体幹加速度計算装置 2 2 0 によって、体幹加速度センサ 2 1 8 の検出値から実際の体幹加速度を求める。

ステップ S 2 8 では、偏差演算装置 3 1 2 によって、目標とする体幹加

速度と実際の体幹加速度との偏差を求める。

ステップS30では、外乱力算出装置310によって、算出された加速度偏差からその加速度偏差をもたらした外乱力 D_r の大きさを求める。

5 ステップS32では、目標補正量算出装置308によって、外乱力 D_r の大きさと伝達関数 $1/G(s)$ に基づいて、体幹位置補正量を算出する。

ステップS34では、補正装置306によって、歩容データ記憶装置210に記憶されている補正前の目標体幹位置に体幹位置補正量を加えて、補正後の目標体幹位置を算出し、関節角群計算装置212へ指示する。

10 コンピュータ装置14の一部ないし全部をロボット外に搭載することもできる。例えば歩容データ記憶装置210と体幹歩容データ補正演算部222をロボット外に設置することができる。この場合には、ロボットで検出された実際の体幹加速度を無線あるいは有線信号で体幹歩容データ補正演算部222に送り、補正された歩容データを無線あるいは有線信号でロ
15 ボットに送る。関節角群計算装置212をもロボット外に搭載してもよい。計算された関節角データを有線または無線信号でアクチュエータ制御部214へ伝達する。

本実施例の歩行ロボットは、足先に力センサがなくても、外乱力に抗して体幹を安定させて歩行し続ける。

20 上記では、体幹の傾斜角度については予定されている変化パターンに従って変化するものとしている。体幹歩容データは、体幹の傾斜角度が予定されている変化パターンに従って変化したときに、実際のZMPを目標ZMPに一致させる体幹位置に関するデータのみを含んでいる。これに対し
25 て、実際のZMPを目標ZMPに一致させる「体幹位置と体幹傾斜角度」を算出し、これを体幹歩容データとしておいてもよい。

体幹傾斜角度については、予定されている変化パターンであることもあれば、算出された変化パターンであることもあるが、いずれにしても目標とする体幹傾斜角度の経時的变化を示すデータが与えられている。ここでいう体幹傾斜角度は、x軸回りの傾斜角度とy軸回りの傾斜角度を言う。

本発明の技術は、体幹位置のみならず体幹角度についても有効である。目標体幹角度の時間に関する 2 階微分値（角加速度）と実際体幹角度の角加速度の偏差を算出し、その偏差に比例する角度と、偏差の 1 階微分に比例する角度、偏差の 2 階微分に比例する角度を算出し、それらから目標体幹角度の補正量を計算するようにすれば、外乱力の影響によって体幹角度が目標体幹角度からずれることを補償することができる。本発明は、体幹位置や体幹傾斜角度等の体幹の位置と姿勢に関する運動に関して一般的に適用することができる。

10 （実施例 2）

ロボットが、体幹位置を検出する装置を搭載していることがある。例えばジャイロを搭載していれば、実際の体幹加速度のみならず実際の体幹位置まで検出することができる。GPS 計測センサを搭載していても、実際の体幹位置を検出することができる。体幹加速度を積分することによって体幹速度を求め、さらに積分することによって体幹位置を検出することもできる。

ロボットが実際の体幹位置を検出することができる場合、フィードバック制御ループを活用することができる。フィードバック制御ループを活用すると、ロボットが不整地を歩行したためにロボットが全体として傾斜する場合にも対応することが可能となる。以下では実施例 2 の説明を行うが、実施例 1 と相違する点のみを説明する。

図 9 は、実施例 2 のロボットのコンピュータ装置の機能をブロック化して示しており、体幹歩容データ補正演算部 224 には、実際の体幹加速度と実際の体幹位置の双方が入力される。

25 図 10 は、体幹歩容データ補正演算部 224 の詳細を示したブロック線図である。図 10 では図示の明瞭化のために、x 方向の事象のみを図示している。y 方向と z 方向についても同様である。

体幹位置センサ 904 がロボットに搭載されているために、実際の体幹位置が計測される。体幹加速度計算装置 220 は、実際の体幹位置を時間

に関して2階微分し、実際の体幹加速度を求める。求められた体幹加速度に基づいて実施例1と同様の処理が実行され、加速度偏差に基づいた補正量 x_d が計算される。

- 5 補正前の目標体幹位置 x_o を加速度偏差に基づいた補正量 x_d で補正した補正後の目標体幹位置 $x_o + x_d$ は、偏差算出装置906に入力され、実際の体幹位置 x_r との偏差 $x_o + x_d - x_r$ が計算される。体幹位置の偏差 $x_o + x_d - x_r$ は、フィードバック処理ブロック908に入力され、伝達関数 $C(s)$ を用いて処理される。偏差 $x_o + x_d - x_r$ を伝達関数 $C(s)$ を用いて処理した値 $C(s)(x_o + x_d - x_r)$ は、加速度偏差
- 10 差に基づいた補正量で補正した目標体幹位置 $x_o + x_d$ に加えられることによって、目標体幹位置をさらに補正する。最終的に補正された目標体幹位置は、 $x_o + x_d + C(s)(x_o + x_d - x_r)$ に補正される。

図11は、実施例2の体幹歩容データ補正演算の処理手順を示したものである。

- 15 ステップS54では、体幹位置センサ904の検出値を取り込む。

ステップS56では、体幹位置センサ904の検出値から、実際の体幹位置と、実際の体幹加速度を検出する。

- 20 ステップS58では、補正前の目標体幹位置 x_o を加速度偏差に基づいた補正量 x_d で補正した目標体幹位置 $x_o + x_d$ と、実際の体幹位置 x_r との偏差 $x_o + x_d - x_r$ を計算する。

ステップS60では、それに伝達関数 $C(s)$ を処理して、フィードバック処理量 $C(s)(x_o + x_d - x_r)$ を計算する。

ステップS62では、関節角群計算装置に指示する目標体幹位置 x_{ref} を、 $x_o + x_d + C(s)(x_o + x_d - x_r)$ に補正する。

25

実施例2に示す脚式ロボットは、偏差 $x_o + x_d - x_r$ を計算し、その偏差が小さくなる側にフィードバック制御することから、ロボットが不整地を歩行してロボットが全体として傾斜する場合でも、目標体幹位置に向けてフィードバック制御することができる。

体幹位置センサは、体幹の傾斜角を実測するジャイロであってもよい。ジャイロで体幹の実際の姿勢角が判明すると、接地脚の足平中心から体幹の重心までの距離 R を乗じることによって、接地脚の足平中心に対する体幹位置を実測することができる。

5

以上、本発明の実施形態について詳細に説明したが、これらは例示に過ぎず、請求の範囲を限定するものではない。例えば、歩容データには、時間と位置で経時的変化を記述する実施例を紹介したが、時間と速度、あるいは時間と加速度の関係で、足先や腕先や体幹の運動の経時的変化を記述してもよい。請求の範囲に記載の技術には、以上に例示した具体例を様々に変形、変更したものが含まれる。

10

また、本明細書または図面に説明した技術要素は、単独であるいは各種の組合わせによって技術的有用性を発揮するものであり、出願時の請求項に記載の組合わせに限定されるものではない。また、本明細書または図面に例示した技術は複数の目的を同時に達成するものであり、そのうちの一つの目的を達成すること自体で技術的有用性を持つものである

15

請求の範囲

1. 体幹と、

体幹に対して揺動可能に連結されている脚リンクと、

目標とする足先運動の経時的変化を記述する足先歩容データの記憶手段

5 と、

目標とする足先運動の変化に追従して歩行を可能とする目標とする体幹運動の経時的変化を記述する体幹歩容データの記憶手段と、

実際の体幹運動を検出する体幹運動検出手段と、

目標とする体幹運動と実際の体幹運動の偏差を算出する偏差算出手段と、

10 算出された偏差から所定の伝達関数に基づいて補正量を求め、その補正量に基づいて体幹歩容データの記憶手段に記憶されている体幹歩容データを補正する補正手段、

を備えている脚式ロボット。

15 2. 前記偏差算出手段が、目標とする体幹加速度と実際の体幹加速度の偏差を算出することを特徴とする請求項 1 の脚式ロボット。

3. 前記補正手段が、加速度偏差から計算される外乱力と所定の伝達関数に基づいて補正量を求めることを特徴とする請求項 2 の脚式ロボット。

20

4. 前記伝達関数が、比例要素を含むことを特徴とする請求項 3 の脚式ロボット。

25 5. 前記伝達関数が、1 次遅れ要素および／または 2 次遅れ要素を含むことを特徴とする請求項 4 の脚式ロボット。

6. 前記補正手段が、加速度偏差に基づいて補正した目標体幹位置と実際の体幹位置の偏差にフィードバック処理を施した量を加算することによって目標体幹位置をさらに補正することを特徴とする請求項 3 の脚式ロボッ

ト。

7. 前記補正手段が、加速度偏差に基づいて補正した目標体幹位置と実際の体幹位置の偏差にフィードバック処理を施した量を加算することによって目標体幹位置をさらに補正することを特徴とする請求項4の脚式ロボット。

8. 前記補正手段が、加速度偏差に基づいて補正した目標体幹位置と実際の体幹位置の偏差にフィードバック処理を施した量を加算することによって目標体幹位置をさらに補正することを特徴とする請求項5の脚式ロボット。

9. 目標とする足先運動の経時的変化を記述する足先歩容データを記憶する工程と、

15 目標足先運動の変化に追従して歩行を可能とする目標とする体幹運動の経時的変化を記述する体幹歩容データを記憶する工程と、

実際の体幹運動を検出する工程と、

目標とする体幹運動と実際の体幹運動の偏差を算出する工程と、

算出された偏差から所定の伝達関数に基づいて補正量を求め、その補正

20 量に基づいて記憶されている体幹歩容データを補正する工程と、

補正された体幹歩容データをロボットの関節角群計算装置に指示する工程と、

を備えている脚式ロボットの歩行制御方法。

25 10. 前記偏差を算出する工程が、目標とする体幹加速度と実際の体幹加速度の偏差を算出し、

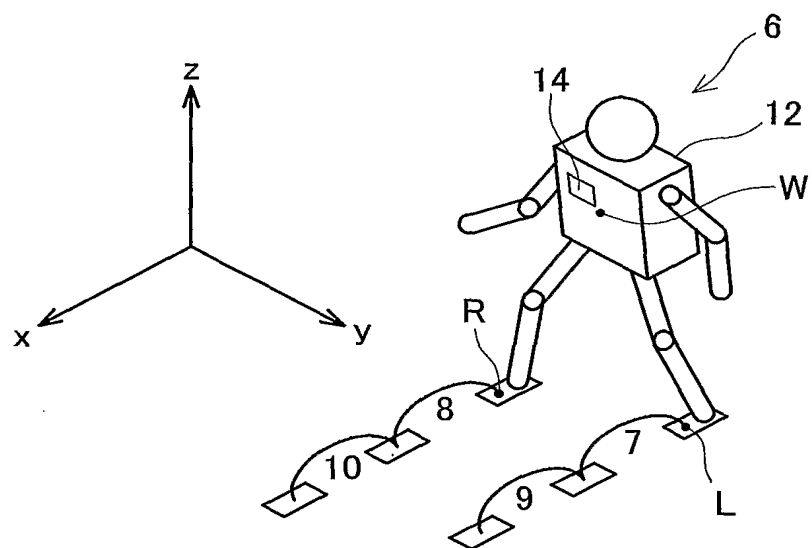
前記補正する工程が、加速度偏差から計算される外乱力と所定の伝達関数に基づいて補正量を求める

ことを特徴とする請求項9の脚式ロボットの歩行制御方法。

11. 前記補正する工程が、加速度偏差に基づいて補正した目標体幹位置と実際の体幹位置の偏差にフィードバック処理を施した量を加算することによって目標体幹位置をさらに補正することを特徴とする請求項10の脚式ロボットの歩行制御方法。

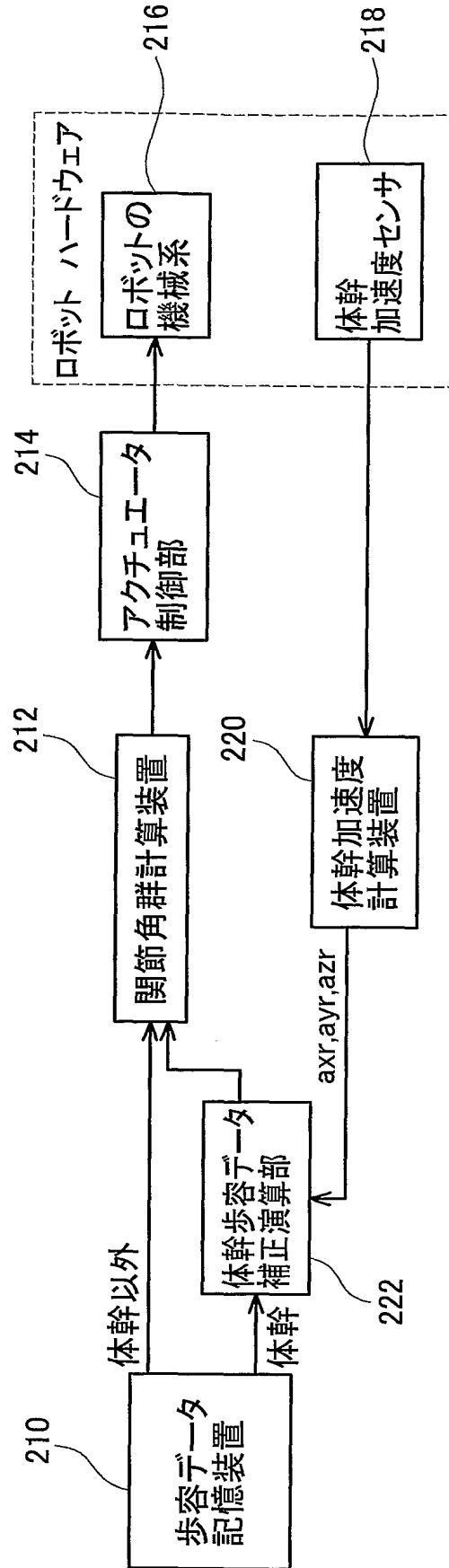
1/10

FIG. 1



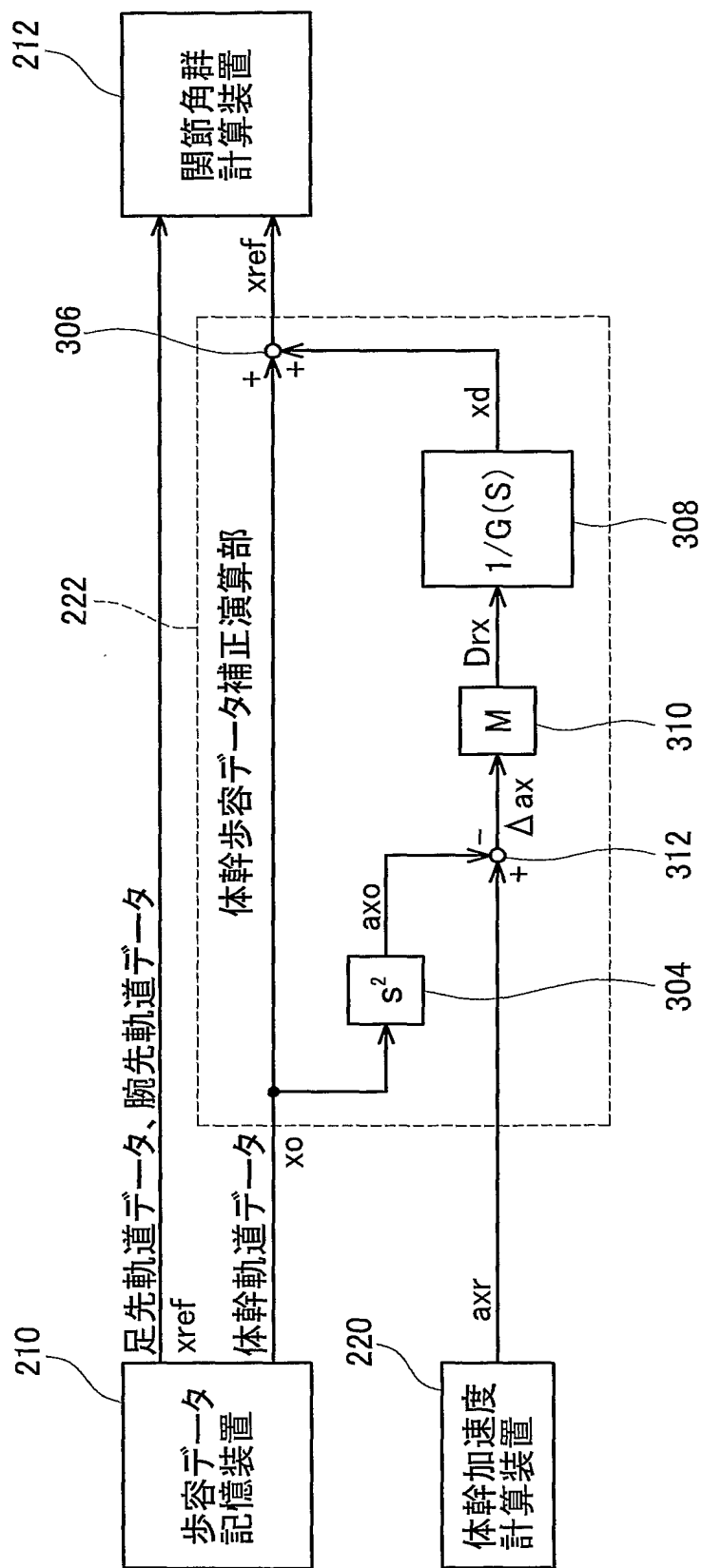
2/10

FIG. 2



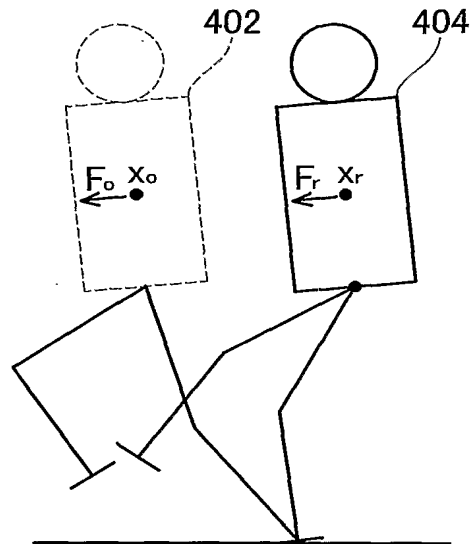
3/10

FIG. 3



4/10

FIG. 4



$$F = M \cdot a \quad (1)$$

$$F_o = M \cdot a_o \quad (2)$$

$$F_r = M \cdot a_r \quad (3)$$

$$D_r = F_r - F_o = M(a_r - a_o) \quad (4)$$

$$D_r = (M_i \cdot s^2 + C_i \cdot s + K_i) \cdot x_d = G(s) \cdot x_d \quad (5)$$

$$x_d = \frac{1}{G(s)} D_r \quad (6)$$

FIG. 5

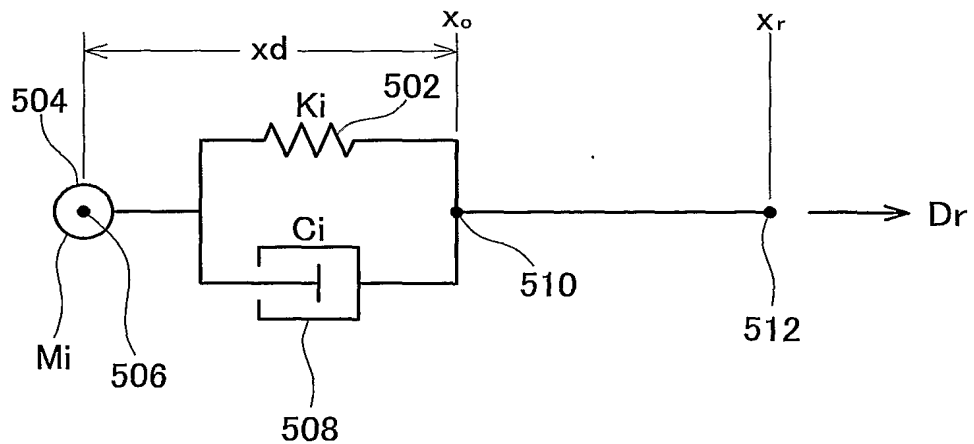
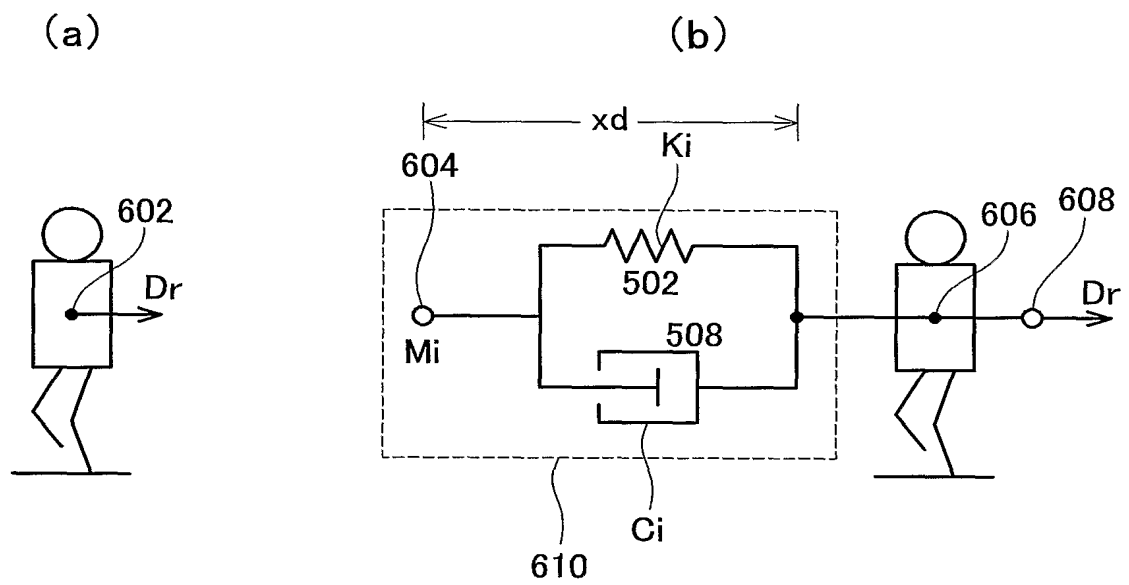
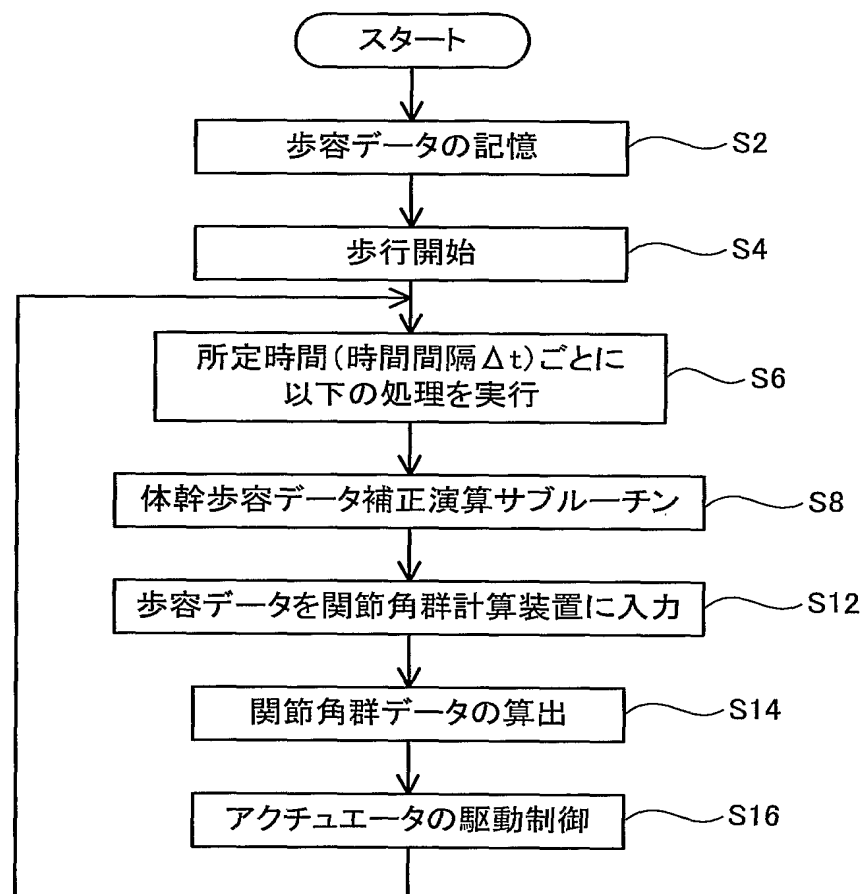


FIG. 6



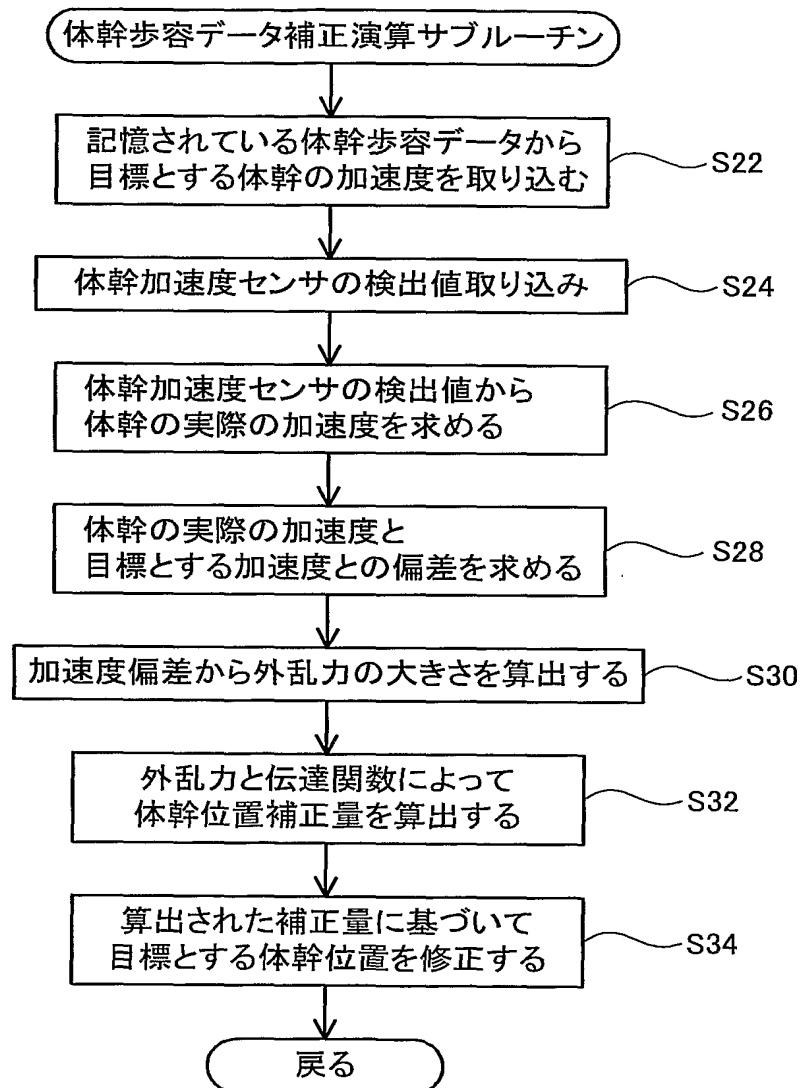
6/10

FIG. 7



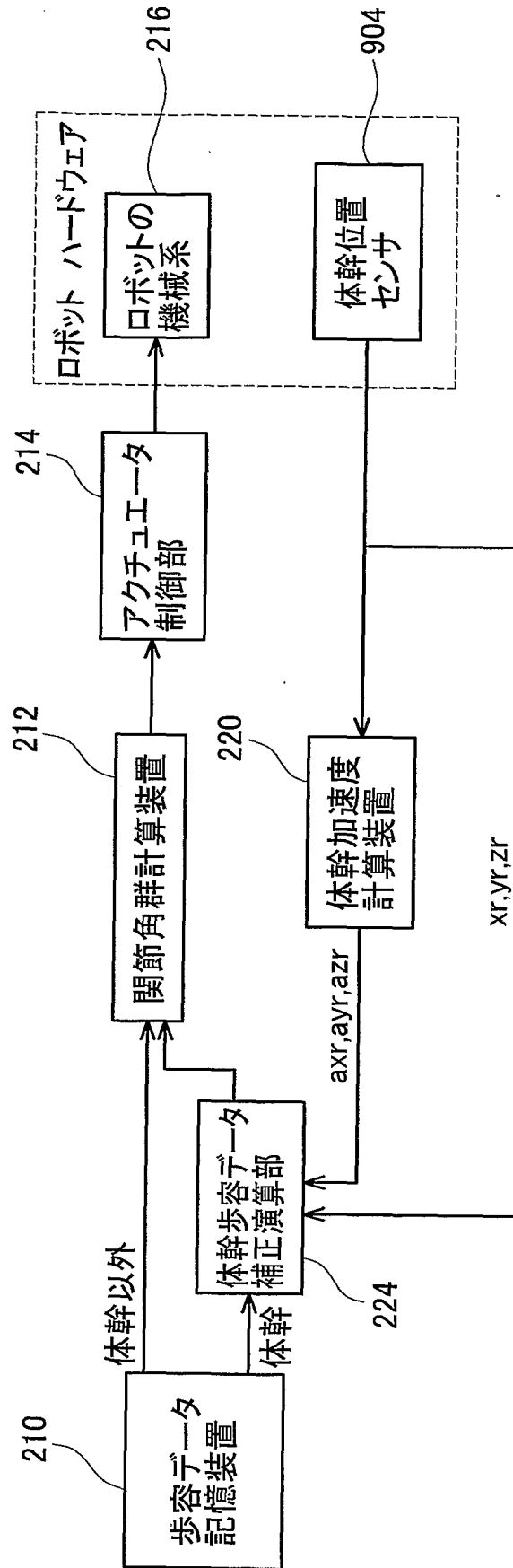
7/10

FIG. 8



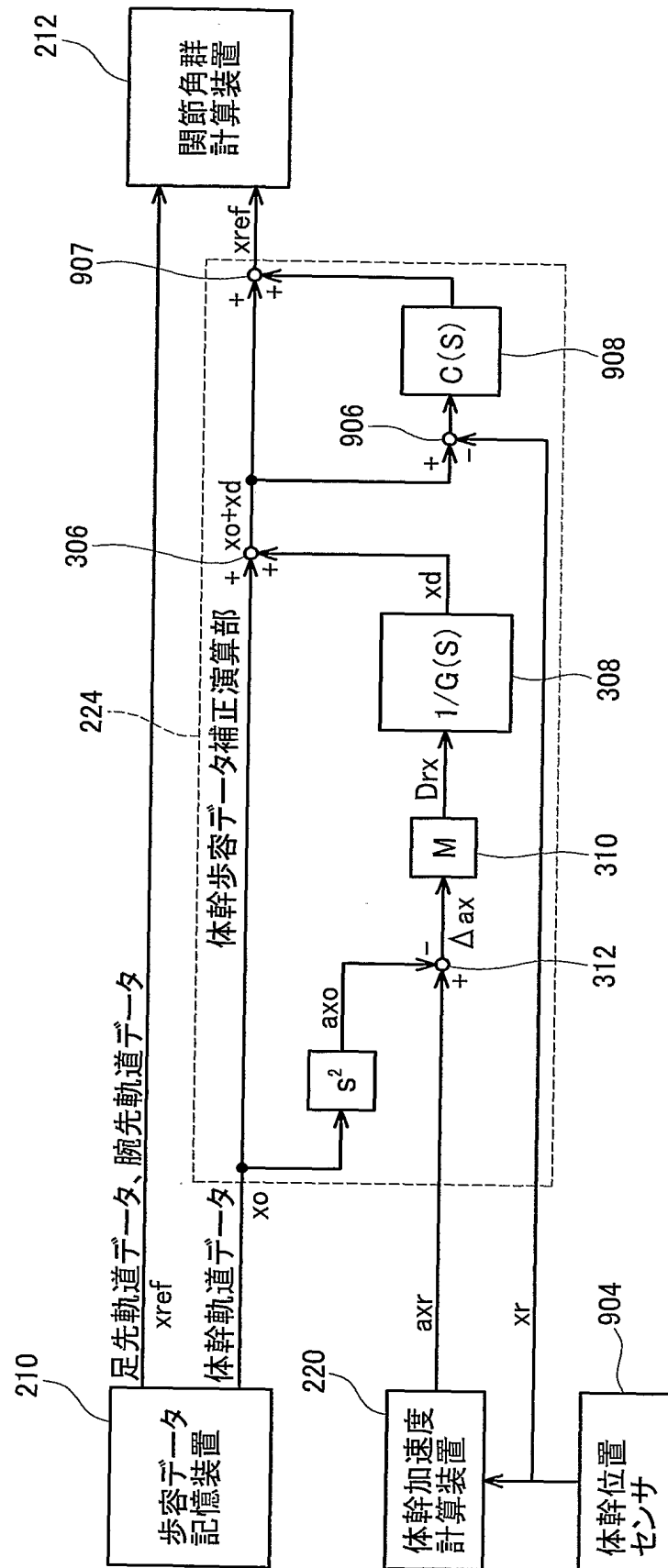
8/10

FIG. 9



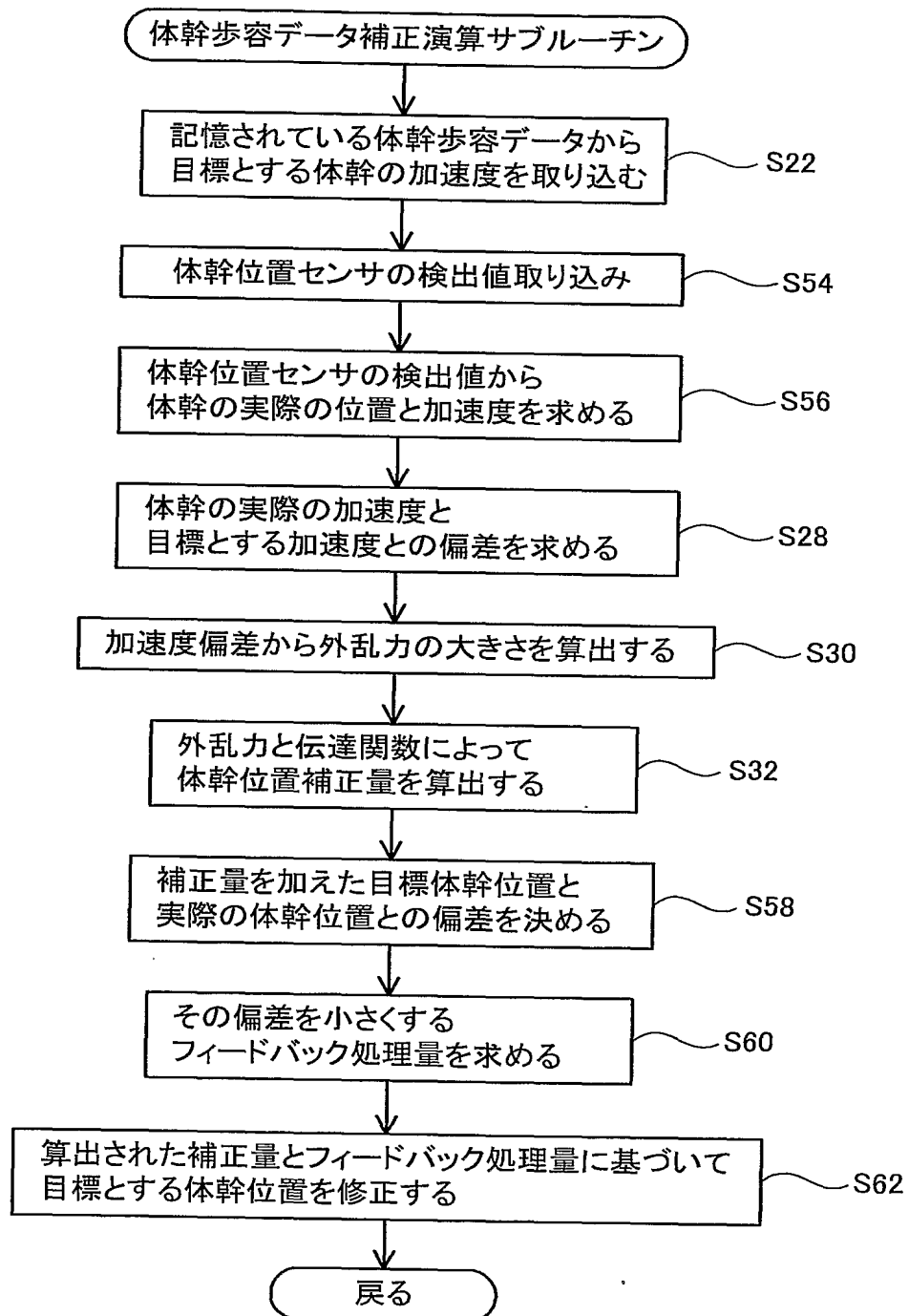
9/10

FIG. 10



10/10

FIG. 11



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/001450

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl⁷ B25J5/00, 13/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl⁷ B25J1/00-21/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2005
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2005 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 10-230485 A (Honda Motor Co., Ltd.), 02 September, 1998 (02.09.98), Full text; all drawings & EP 0965416 A1 & US 2002/0022907 A1	1-11
P, X	JP 2004-181613 A (Sony Corp.), 02 July, 1994 (02.07.94), Full text; all drawings & EP 1486298 A1	1-11

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search
06 May, 2005 (06.05.05)

Date of mailing of the international search report
24 May, 2005 (24.05.05)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.⁷ B25J5/00, 13/00

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.⁷ B25J1/00-21/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2005年
日本国実用新案登録公報	1996-2005年
日本国登録実用新案公報	1994-2005年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	JP 10-230485 A (本田技研工業株式会社) 1998. 09. 02, 全文, 全図 &EP 0965416 A1 &US 2002/0022907 A1	1-11
P; X	JP 2004-181613 A (ソニー株式会社) 2004. 07. 02, 全文, 全図 &EP 1486298 A1	1-11

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

06. 05. 2005

国際調査報告の発送日

24. 5. 2005

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

二階堂 恭弘

電話番号 03-3581-1101 内線 3321

3U

3118

第IV欄 要約 (第1ページの5の続き)

脚式ロボットにおける、目標とする体幹運動と実際の体幹運動との偏差を算出し、算出された偏差に基づいて、前記目標とする体幹運動を補正する。